

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО"

ПЕШКІН АНТОН МИХАЙЛОВИЧ



УДК 621.391

**ФОРМУВАННЯ СИГНАЛЬНО-КОДОВИХ КОНСТРУКЦІЙ НА
ОСНОВІ КОДІВ, ЗАБЕЗПЕЧУЮЧИХ МАКСИМАЛЬНЕ
НАБЛИЖЕННЯ ДО ГРАНИЦІ ШЕННОНА**

05.12.02 – Телекомунікаційні системи та мережі

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеню
кандидата технічних наук

Київ – 2018

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі телекомунікаційних систем в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник

доктор технічних наук, професор,
Заслужений діяч науки і техніки
України
Уривський Леонід Олександрович
Національний технічний університет
України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського»,
завідувач кафедри
телекомунікаційних систем

Офіційні опоненти

доктор технічних наук, професор
Печурін Микола Капітонович
Національний авіаційний
університет,
професор кафедри комп'ютерних
систем та мереж

кандидат технічних наук, доцент
Ткаченко Ольга Миколаївна
Державний університет
телекомунікацій,
доцент кафедри телекомунікаційних
систем та мереж

Захист відбудеться «19» березня 2018 р. о 15:00 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.002.14 в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056 м. Київ, пр. Перемоги, 37, корп. 1. ауд. 255

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056 м. Київ, пр. Перемоги, 37

Автореферат розісланий «1» лютого 2017 р.

В.о. вченого секретаря спеціалізованої вченої ради
д.т.н., проф.



С. Я. Жук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В сучасному суспільстві все більшим попитом користуються послуги, які потребують використання значного обчислювального ресурсу абонентських пристроїв та **високошвидкісних телекомунікаційних каналів**: телебачення надвисокої роздільної здатності (UHDTV), хмарні сховища (Google Cloud Storage, Amazon Web Services) для зберігання великих об'ємів даних. Для забезпечення доступу до наведених послуг кожному користувачу необхідно надати канал зв'язку, швидкість якого визначається десятками, а часом, і сотнями Мбіт/с.

В той же час сучасне суспільство характеризується **високою мобільністю**: доступ до зазначених послуг має бути забезпечений будь-де та будь-коли. З даного факту можна зробити висновок, що значну долю телекомунікаційного трафіку будуть обслуговувати **безпроводні** засоби зв'язку, а отже, додатковим обмеженням ресурсу каналу зв'язку є спільне середовище передачі даних.

Базовим інструментом задоволення вимог до передачі інформації при обмеженому ресурсі каналу зв'язку є застосування інформаційно ємних сигналів – сигналів багатопозиційної модуляції. Питаннями обробки та передачі сигналів займається теорія потенційної завадостійкості, засновником якої є А.В. Котельніков. У сучасних телекомунікаційних системах широко використовуються такі види модуляції, як QPSK, QAM-16, QAM-64, QAM-256.

В той же час застосування багатопозиційної модуляції призводить до погіршення якості зв'язку. Дана проблема вирішується застосуванням завадостійких кодів, питаннями формування яких займається теорія завадостійкого кодування. Проте, при завадостійкому кодуванні ресурси каналу використовуються як для передачі повідомлень джерела, так і для передачі надлишкових повідомлень, в результаті чого зменшується інформаційна ємність повідомлень, які передаються по каналу зв'язку. Найбільш розповсюджені види завадостійкого кодування, які використовуються в сучасних телекомунікаційних системах, є неперервні коди, двійкові блокові коди (БЧХ, LDPC), недвійкові блокові коди Ріда-Соломона, каскадні коди.

Вибір в каналі зв'язку з відомими параметрами раціонального сполучення в одному сигналі виду модуляції з максимально допустимою кратністю та ефективно виправляючого коду, який забезпечує необхідну достовірність, призводить до поняття сигнально-кодової конструкції.

Ключ до вирішення такої задачі лежить у площині третьої фундаментальної науки – теорії інформації, засновником якої є К. Шеннон.

Згідно положенням цієї теорії головною характеристикою каналу зв'язку є його пропускна здатність – максимальна швидкість передачі інформації. Іншою характеристикою є фактична швидкість передачі інформації джерела – продуктивність.

Міра наближення продуктивності каналу зв'язку до його пропускної здатності характеризує інформаційну ефективність системи передачі інформації.

Тому розробка методики формування сигнально-кодових конструкцій, які

дозволяють максимально ефективно використовувати ресурси каналу зв'язку є важливою задачею при проектуванні та оптимізації існуючих та перспективних систем передачі даних. Цільовий функціонал дослідження передбачає досягнення найкращої інформаційної ефективності при обмежених ресурсах каналу зв'язку при задовільненні вимог до достовірності передачі інформації із використанням оптимальних видів сигнальних і кодових конструкцій.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами Дослідження даної роботи проводились згідно з планами КПП ім. Ігоря Сікорського в рамках науково-дослідних робіт:

– НДР кафедри телекомунікаційних систем Інституту телекомунікаційних систем «Синтез та конструктивна реалізація сигнально-кодових конструкцій в каналах з багатопозиційною маніпуляцією в системах супутникового та радіорелейного зв'язку» № ДР 0113U002491;

– НДР кафедри телекомунікаційних систем Інституту телекомунікаційних систем «Уніфікований пристрій для завадостійкої передачі інформації у високошвидкісних каналах радіорелейного та супутникового зв'язку» № ДР 0115U000259;

– НДР кафедри телекомунікаційних систем Інституту телекомунікаційних систем «Методи та системи управління безпроводовими сенсорними мережами із мобільними сенсорами і телекомунікаційними наземними вузлами та аероплатформами у зоні надзвичайної ситуації» № ДР 0117U004282.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є синтез сигнально-кодових конструкцій, які максимально наближують продуктивність каналу зв'язку до його пропускної здатності, забезпечуючи при цьому задану достовірність передачі інформації.

Відповідно до мети, основними задачами дослідження є:

1. Розробка методики синтезу блокових, неперервних і каскадних кодів, оптимальних за критерієм максимального наближення до границі Шеннона.
2. Розробка методики порівняльного аналізу блокових, неперервних і каскадних кодів за еквівалентними параметрами виправної здатності.
3. Визначення та аналіз границь можливого використання завадостійких кодів в залежності від енергетичних характеристик каналу та вимог до достовірності передавання інформації.
4. Формування критерію інформаційної ефективності використання сигнально-кодових конструкцій та розробка методики їх порівняльної оцінки за мірою наближення до границі Шеннона.
5. Розробка методики синтезу сигнально-кодових конструкцій на основі завадостійких кодів, які максимально наближують продуктивність каналу зв'язку до границі Шеннона.

Об'єктом досліджень є сигнально-кодові конструкції систем передачі даних.

Предметом досліджень є методика формування сигнально-кодових конструкцій, які забезпечують максимальне наближення до границі Шеннона.

Методами досліджень є методи математичного аналізу, теорії системного аналізу, теорії потенційної завадостійкості, теорії інформації, теорії оптимізації,

математичної статистики, методи і методики імітаційного моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Методика синтезу завадостійких кодів, оптимальних за критерієм максимального наближення продуктивності джерела до границі Шеннона, яка відрізняється тим, що дозволяє для каналу зв'язку із відомими енергетичними параметрами обрати такий код, який дозволив би передавати повідомлення джерела з максимальною швидкістю кодування за умов забезпечення заданої достовірності.

2. Методика порівняння виправних здібностей завадостійких кодів різних видів, яка відрізняється тим, що з використанням особливих характеристик неперервних та каскадних кодів визначаються їх коригувальні здібності за порівняльними параметрами еквівалентних блокових кодів.

3. Методика синтезу сигнально-кодових конструкцій, оптимальних за критерієм максимального наближення продуктивності джерела до границі Шеннона, яка відрізняється тим, що, поєднуючи у собі положення теорії інформації і теорії завадостійкого кодування, дозволяє для каналу зв'язку із відомими енергетичними параметрами обрати таке сполучення модуляції і завадостійкого коду, який дозволив би передавати повідомлення джерела з максимальною швидкістю за умов забезпечення заданої достовірності.

4. Методика кількісної оцінки границь існування завадостійких кодів, яка відрізняється тим, що використовує теоретичні границі існування завадостійких кодів та дозволяє для відомої енергетики в каналі зв'язку визначити код, здатний забезпечити необхідну достовірність, або довести відсутність такої можливості.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що:

– результати досліджень використані у держбюджетних НДР № 0113U002491 «Синтез та конструктивна реалізація сигнально-кодових конструкцій в каналах з багатопозиційною маніпуляцією в системах супутникового та радіорелейного зв'язку», № 0115U00025 «Уніфікований пристрій для завадостійкої передачі інформації у високошвидкісних каналах радіорелейного та супутникового зв'язку» та в даний час є частиною поточної держбюджетної НДР № 0117U004282 «Методи та системи управління безпроводовими сенсорними мережами із мобільними сенсорами і телекомунікаційними наземними вузлами та аероплатформами у зоні надзвичайної ситуації»;

– отриманий патент на корисну модель № UA-117164-U від 26.06.2017 «Спосіб досягнення максимальної продуктивності в дискретному каналі зв'язку з завадостійким кодуванням»;

– отримані результати використані в учбовому процесі: підготовка бакалаврів – «Основи теорії телекомунікацій»; підготовка магістрів – «Основи прикладної теорії інформації для телекомунікацій»; підготовка докторів філософії – «Інноваційні напрямки розвитку телекомунікацій та радіотехніки»;

– визначені теоретичні та практичні границі застосування відомих та потенційно можливих завадостійких блокових, неперервних і каскадних кодів, що практично важливо при оцінці якості існуючої і створюваної техніки і стандартів зв'язку;

– запропонована структурна схема приладу (додаток В) та запропонована

програмна версія керування блоком зміни видів кодування та модуляції для реалізації в пристроях адаптивного зв'язку (SDR), які реагують на зміну енергетичних умов в радіолінії

Особистий внесок здобувача. Робота виконана на кафедрі телекомунікаційних систем ІТС НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». Основні результати, отриманні в роботі, опубліковані в спеціалізованих виданнях. Автором опублікований та запропонований спосіб визначення необхідної виправної здатності завадостійких кодів при заданих вимогах до достовірності і заданій довжині кодового блоку, методика оцінки ефективності завадостійких кодів за критерієм максимального наближення до границі Шеннона, методика синтезу завадостійких кодів за критерієм максимального наближення до границі Шеннона, методика порівняння завадостійких властивостей блокових, неперервних та каскадних кодів за критерієм еквівалентної виправної здатності, визначені енергетичні границі використання різних видів завадостійких кодів, розроблено методику синтезу сигнально-кодових конструкцій за критерієм максимального наближення продуктивності каналу зв'язку до його пропускної здатності.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертації пройшли апробацію на 9-ти міжнародних конференціях: Проблеми телекомунікацій-2012», м. Київ, Україна, 2012; «Інфокомунікації — сучасність та майбутнє», м. Одеса, Україна, 2012; «Проблеми телекомунікацій-2013», м. Київ, Україна, 2013; «Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки», м. Чернівці, Україна, 2014; «Проблеми телекомунікацій-2015», м. Київ, Україна, 2015; «Інфокомунікації – сучасність та майбутнє», м. Одеса, Україна, 2015; «Проблеми телекомунікацій-2016», м. Київ, Україна, 2016; «IEEE Міжнародна конференція з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки УкрМіКо'2016», Україна; «IEEE Міжнародна конференція з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки УкрМіКо'2017», Україна.

Публікації за темою дисертації. За результатами досліджень опубліковано 15 наукових праць, у тому числі 5 статей у наукових фахових виданнях (з них 3 статті у виданнях України [1-3], 2 статті у виданнях іноземних держав [4, 5], які включені до міжнародних наукометричних баз), 1 патент на корисну модель [6], 9 тез доповідей у збірниках матеріалів міжнародних конференцій.

Структура і об'єм дисертації. Робота складається зі вступу, 5 розділів, висновку, списку використаної літератури. Загальний обсяг дисертації становить 141 сторінку, 63 рисунки, 8 таблиць, 110 бібліографічних джерел на 12 сторінках, додатки на 10 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У Вступі обґрунтовується актуальність теми дисертаційної роботи. Визначено мету роботи, основні задачі та методи досліджень. Сформульовано наукову новизну і практичне значення отриманих результатів.

У першому розділі розглянуті принципи формування сигнально-кодових

конструкцій (СКК), які використовуються в сучасних телекомунікаційних системах, а також сформовані критерії ефективності СКК.

Базовим інструментом задоволення вимог до передачі інформації при обмеженому ресурсі каналу зв'язку є застосування інформаційно містких сигналів – сигналів багатопозиційної модуляції. Застосування багатопозиційної модуляції вирішує задачу передачі інформації з максимальною швидкістю.

В той же час збільшення порядку модуляції сприяє більшій вразливості сигналів до завад. Для вирішення задачі боротьби з завадами використовується завадостійке кодування, яке в свою чергу призводить до використання ресурсу каналу як для передачі повідомлень джерела, так і для передачі надлишкових повідомлень, що зменшує фактичну швидкість передачі повідомлень джерела.

Таким чином, основним принципом формування сигнально-кодових конструкцій, які використовуються в сучасних телекомунікаційних системах, є подолання суперечливих вимог забезпечення максимальної швидкості передачі інформації при обмеженому ресурсі шляхом застосування багатопозиційної модуляції та забезпечення необхідної достовірності шляхом застосування завадостійкого кодування.

Для оцінки СКК використовується показник інформаційної ефективності, який є мірою відношення переданої інформації до інформаційної ємності каналу – пропускної здатності неперервного каналу зв'язку C_H – і обчислюється за виразом:

$$\eta = \frac{R}{C_H} \quad (1)$$

У виразі (1) R - продуктивність дискретного каналу зв'язку, яка відповідає фактичній швидкості передачі повідомлень у каналі зв'язку і знаходиться за наступним виразом:

$$R = V_S \cdot [1 + P \cdot \log P + (1 - P) \cdot \log(1 - P)], \quad (2)$$

де P – ймовірність помилки в біті на виході декодера завадостійкого коду.

Швидкість передачі бітів джерела може бути задана наступним співвідношенням:

$$V_S = V_C \cdot r_c \cdot m; m = \log M, \quad (3)$$

де r_c – кодова швидкість – відношення кількості інформаційних бітів до загальної кількості бітів у повідомленні, V_C – швидкість передачі символів у каналі зв'язку, m – кількість бітів у символі, M – кратність багатопозиційної модуляції.

Пропускна здатність неперервного каналу зв'язку C_H знаходиться за виразом:

$$C_H = \Delta F \cdot \log_2(1 + h_{\text{ПРМ}}^2), \quad (4)$$

де ΔF – полоса займаємих частот, $h_{\text{ПРМ}}^2$ – енергетичний параметр каналу зв'язку у точці прийому:

$$h_{\text{ПРМ}}^2 = \frac{P_{\text{ПРМ}}}{N_0 \cdot \Delta F}, \quad (5)$$

де N_0 – спектральна щільність потужності шуму; $P_{\text{ПРМ}}$ – потужність сигналу в точці прийому.

Окрім того, СКК може бути оцінена через показники використання ресурсу каналу зв'язку. Частотна ефективність γ відображає обсяг переданої інформації на одиницю частотного ресурсу:

$$\gamma = \frac{R}{\Delta F} \quad (6)$$

Енергетична ефективність β відображає обсяг переданої інформації на одиницю енергетичного ресурсу:

$$\beta = \frac{R_d}{\alpha} = \frac{R \cdot N_0}{P_{\text{ПРМ}}}, \quad (7)$$

де α – допоміжний енергетичний параметр каналу зв'язку у точці прийому:

$$\alpha = \frac{P_{\text{ПРМ}}}{N_0} \quad (8)$$

Відобразимо можливі способи досягнення необхідної достовірності на графіку у вигляді залежності $\eta = f(\beta, \gamma)$ – рис. 1.

Позначимо вихідну інформаційну ефективність сигналу η_1 із припущенням, що достовірність цього сигналу не відповідає вимогам.

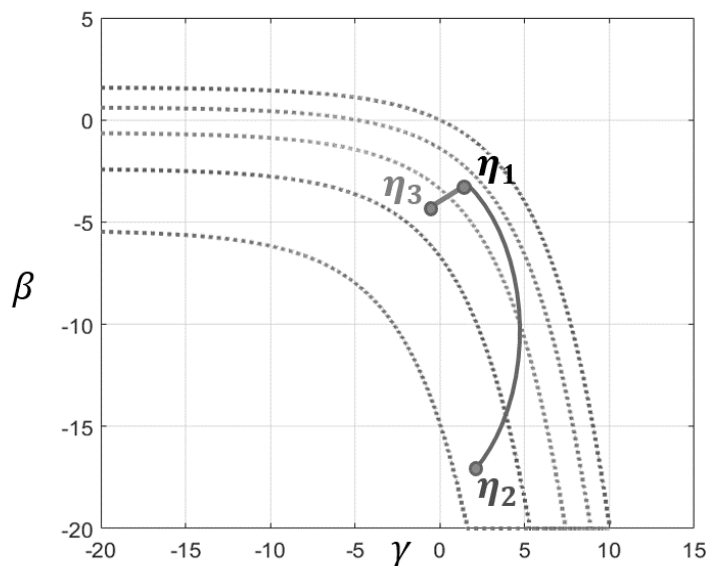


Рис. 1. Інформаційна ефективність в модифікованих координатах А.Г. Зюко

Досягнення необхідної достовірності шляхом збільшення енергетики сигналу в точці прийому або зменшення швидкості передачі повідомлень джерела визначається однаковою траєкторією – переходом η_1 - η_2 .

Даний підхід характеризується значним зниженням інформаційної, енергетичної та частотної ефективності.

Альтернативним способом є застосування ефективної СКК, яка забезпечує необхідну достовірність при мінімальних втратах в ефективності.

Отже, поєднання в СКК найбільш продуктивної багатопозиційної модуляції з завадостійким кодом, який має забезпечити необхідну достовірність дозволяє досягнути мети функціонування каналу зв'язку із значно меншими втратами ефективності – переходом η_1 - η_3 .

В даній роботі в рамках однієї моделі розглядаються наступні категорії:

- канал зв'язку, який характеризується полосою частот, рівнем шуму та енергетикою сигналу;
- вид сигнальної конструкції, яка визначає інформаційну місткість повідомлень;
- завадостійкість повідомлень та кодова конструкція, яка дозволяє забезпечити необхідну достовірність ціною зменшення кількості інформації у повідомленні.

Постановка завдання дослідження та формування кінцевого функціоналу інформаційної ефективності може бути ілюстрована рис. 2.

Класична теорія завадостійкості дозволяє вирахувати вірогідність p_6 на виході демодулятора, теорія кодування – вірогідність P на виході декодера, теорія інформації пропонує критерій та показники інформаційної ефективності (1), (6), (7). Функціонал інформаційної ефективності є кінцевим результатом розглянутої концепції.



Рис. 2. Постановка завдання та формування критерію оптимальності СКК

В якості інструментів досягнення можливої продуктивності будуть використовуватися такі види модуляції, як ФМ-2, QPSK, QAM-16, QAM-64.

Для завадостійкого кодування будуть розглядатися блокові коди БЧХ, Ріда-Соломона, LDPC, неперервні коди з алгоритмом декодування Вітербі та каскадні коди.

Метою роботи є оцінка ефективності сигнально-кодових конструкцій в каналі з заданими параметрами та формування найкращої сигнально-кової конструкції, яка дозволяє досягати максимуму інформаційної ефективності в каналі з заданими параметрами при забезпеченні необхідної достовірності.

У другому розділі досліджено синтез блокових кодів, оптимальних за критерієм максимального наближення до границі Шеннона. В рамках цього дослідження проаналізовано корегувальні властивості бінарних блокових кодів, багатопозиційних блокових кодів Ріда-Соломона та граничні корегувальні властивості завадостійких блокових кодів.

Відповідь на одне з найважливіших питань в теорії кодування, а саме, визначення надлишковості коду, яка гарантує необхідну достовірність передачі інформації по каналу зв'язку, дав аналіз границі завадостійкого кодування Плоткіна та Варшамова-Гільберта, які визначають взаємозв'язок між кодовою відстанню d , що дорівнює мінімальній кодовій відстані по Хемінгу серед усіх пар дозволених комбінацій, кількістю інформаційних k та надлишкових символів r у кодовому блоці довжиною n .

Сформулюємо границю Варшамова-Гільберта, яка є границею існування завадостійких кодів. Нехай існує (n, k) – код з мінімальною відстанню d , тоді такий код задовольняє наступну нерівність:

$$n - k \leq \log_2 \sum_{i=0}^{d-2} C_{n-1}^i \quad (9)$$

Сформулюємо границю Плоткіна, яка є границею корегувальних властивостей завадостійких кодів. Якщо довжина кодового блоку $n \geq 2d - 1$, то кількість перевірючих символів $r = n - k$, необхідних для того, щоб мінімальна відстань лінійного коду досягала значення d , дорівнює щонайменш $2d - 2 - \log_2 d$. Як наслідок,

$$R \leq 1 - \frac{2d - 2 - \log_2 d}{n} \quad (10)$$

На рис. 3 представлений графік вказаних вище границь у відносних координатах $(d/2n ; k/n)$, де вісь $X = d/2n$ характеризує виправляючу здатність коду, а $Y = r_c = k/n$ - це кодова швидкість, яка дорівнює частці інформаційних символів у кодовому блоці.

Найкращі коди мають знаходитися між границями Плоткіна і Варшамова-Гільберта. Кодів за межами границі Плоткіна не існує.

Перейдемо до розгляду недвійкових кодів Ріда-Соломона (РС). Дані коди є оптимальними з точки зору співвідношення довжини кодового слова і корегувальної здатності – використовуючи $r_s = 2t$ перевірючих символів, вони можуть виправляти не менше ніж t помилок. РС-коди мають мінімальну кодову відстань (відстань Хеммінга) $n_s - k_s + 1$ і є кодами з максимально досяжною відстанню.

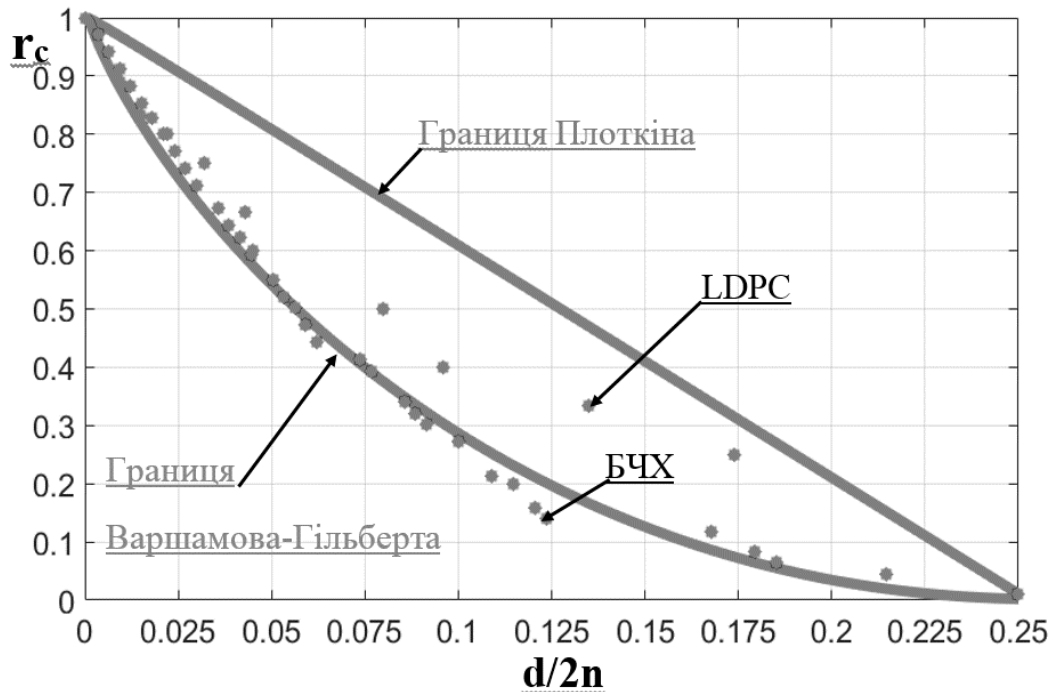


Рис. 3 Границі завадостійкого кодування Плоткіна і Варшамова-Гільберта з кодами БЧХ та LDPC

Використання переходу від символного до бітового представлення РС-кодів, дає змогу обчислити їх корегувальну та інформаційну ефективності та порівняти виправну здатність РС-кодів із виправною здатністю двійкових кодів, яка обчислюється на основі біноміального розподілу.

Відображення РС-кодів у площині границь завадостійких кодів Плоткіна та Варшамова-Гільберта (В-Г) дало змогу оцінити їх інформаційну ефективність.

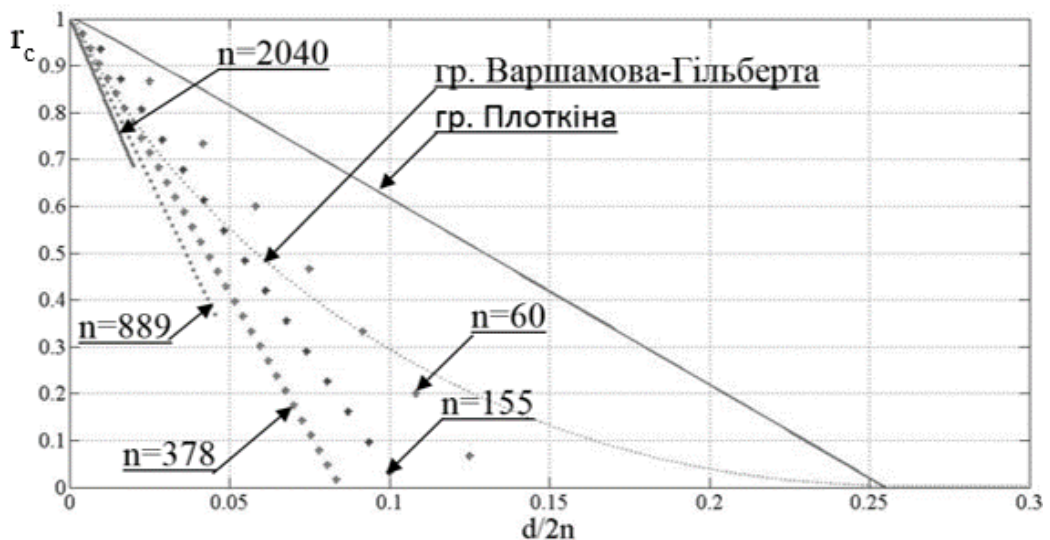


Рис. 4. Зображення бінарних границь завадостійкого кодування Плоткіна та В-Г для $n = 600$ із РС-кодами: $n \in \{60, 155, 378, 889, 2040\}$, $m \in \{4, 5, 6, 7, 8\}$, $t \in [1, 2 \dots]$

З рис. 4 видно, що коди, довжина блоку яких близька до довжини блоку границь Плоткіна та В-Г, проходять вздовж нижньої границі В-Г при швидкостях $r_c > 0.8$ і проходять нижче даної границі для швидкостей $r_c < 0.8$. З цього можна зробити

висновок, що РС-коди не є ефективними з точки зору продуктивності, оскільки високопродуктивні коди мають знаходитися між границями Плоткіна та В-Г, наприклад двійкові БЧХ-коди.

Побудова залежності бітової ймовірності помилки на виході декодера від характеристик коду та ймовірності помилки у каналі дала змогу оцінити виправну здатність РС-кодів. Виявилося, що вони мають гіршу завадостійкість ніж еквівалентні бінарні коди. Ефективність РС-кодів у каналі із групуванням помилок зростає, оскільки збільшується ймовірність потрапляння бітових помилок у межі символів.

Розглянемо методику синтезу оптимального завадостійкого коду за критерієм максимального наближення до границі Шеннона, зображену на рис. 5.

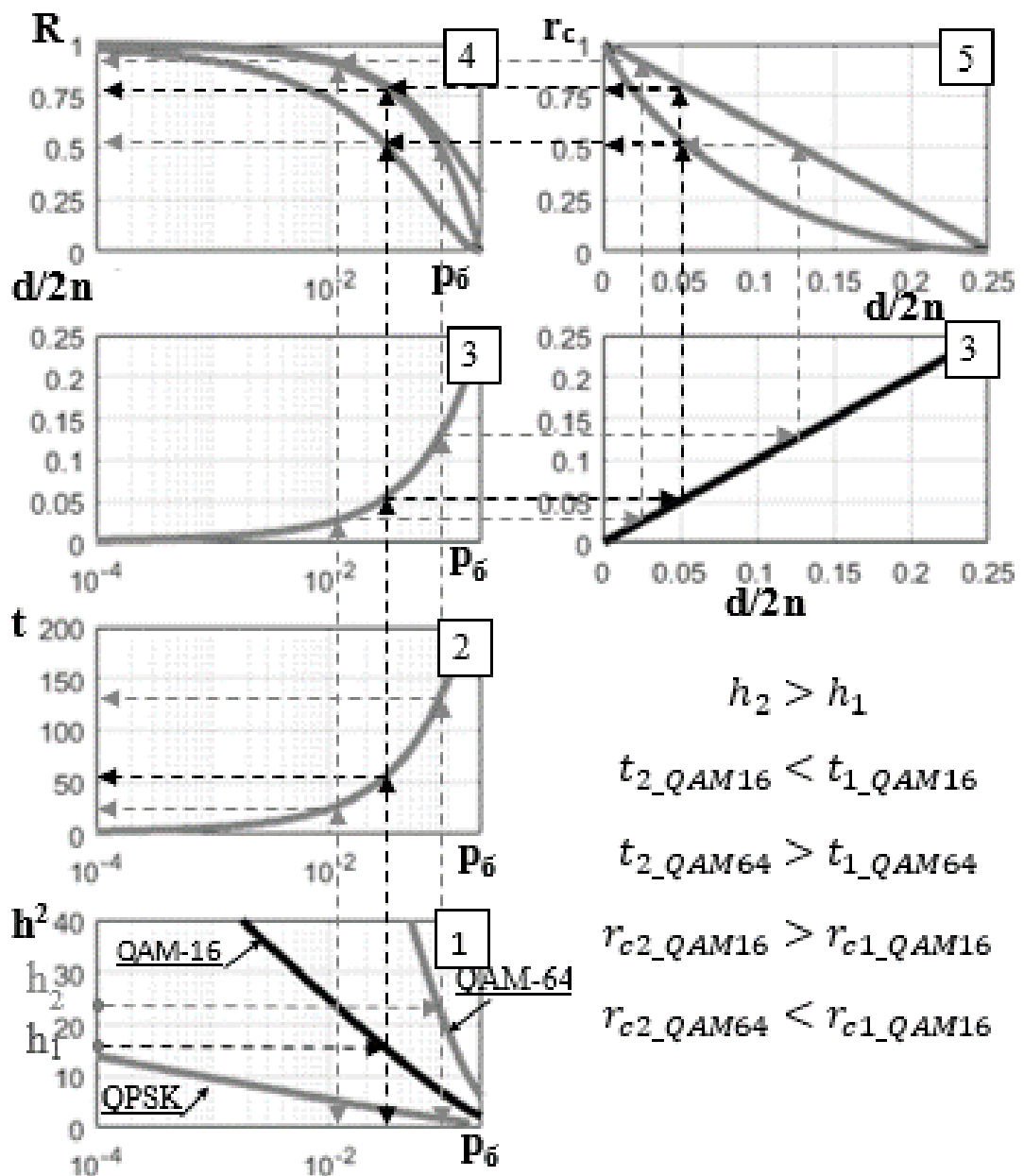


Рис. 5. Алгоритм синтезу блокового коду довжиною $n=1023$

Вихідними дані:

- ймовірність помилкового прийому;
- необхідна достовірність, яка визначається ймовірністю помилки на виході декодера P ;
- обмеження складності кодування, яке виражається максимальним значенням довжини кодового блоку n .

Першим кроком є побудова залежності ймовірності помилки від обраного виду модуляції для заданої довжини блоку.

Другим кроком є визначення необхідної корегувальної здатності завадостійкого коду з використанням виразу для біноміального розподілу.

Третім кроком є перенесення отриманих результатів у відносні координати $d/2n$.

Четвертим кроком є визначення меж існування коду між границями Плоткіна та Варшмова-Гільберта.

П'ятим кроком є вибір реального коду з існуючих, як показано на рис. 6.

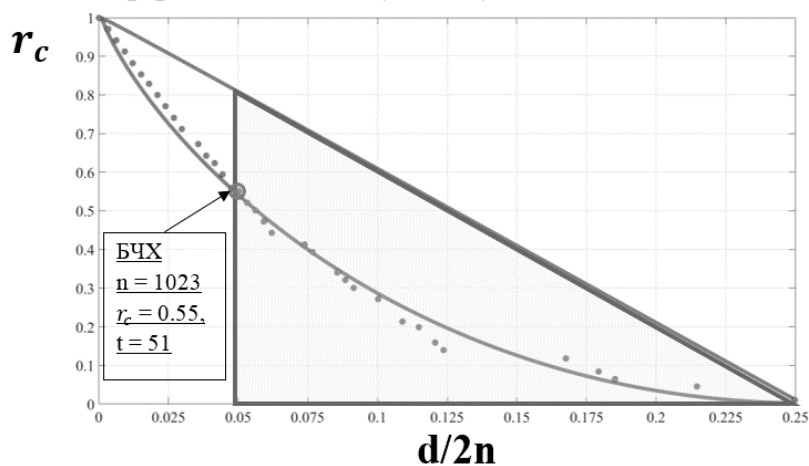


Рис. 6. Графічна ілюстрація границь завадостійкого кодування із межею, яка розділяє коди на ті, що задовольняють вимогам достовірності передачі та на ті, що не задовольняють вимогам достовірності передачі

Таким чином, сформована методика синтезу блокових кодів, оптимальних за критерієм максимального наближення продуктивності каналу до границі Шеннона. Використовуючи методику формування оптимального блокового коду, можливо, за умов забезпечення необхідної достовірності, обрати код, який має максимальну швидкість, а отже, забезпечує максимальне наближення продуктивності каналу до границі Шеннона.

У третьому розділі розроблено методику визначення параметрів неперервних кодів, оптимальних за критерієм максимального наближення до границі Шеннона. Проаналізовані основні параметри неперервних кодів. До них відносяться кодова швидкість r_c та довжина кодового обмеження D . Використовуючи данні параметри та відомі співвідношення для отримання ймовірності помилки на виході декодера в залежності від каналної ймовірності, були отримані параметри неперервних кодів,

еквівалентні параметрам блокових кодів. Користуючись отриманими результатами, стало можливим порівнювати виправну здатність блокових та неперервних кодів при фіксованій кодовій швидкості, а отже порівнювати ефективність блокових та неперервних кодів.

Ймовірність помилки на виході декодера оцінюється верхньою границею, яка визначається з міркувань, що ймовірність події виникнення одної, двох чи більше помилок не перевищує суми ймовірностей подій виникнення одної, двох чи більше помилок. Причому помилка при прийомі кодової комбінації виникає тоді, коли прийнята комбінація відстоїть від переданої на відстань більшу ніж d_L .

Вираз для оцінки ймовірності помилки набуває наступного вигляду:

$$P \leq \sum_{k=d_f}^{\infty} W_k \cdot P_k, \quad (11)$$

де W_k – коефіцієнти спектра коду, які дорівнюють кількості помилок на виході декодера, які виникли коли прийнята кодова комбінація відстояла від переданої на відстань $k = d_f$;

Складові спектра з ростом k збільшуються, але в той же час значення ймовірностей P_k зменшуються набагато швидше, тому зазвичай враховують перші 5 добутоків $W_k \cdot P_k$, якщо канална ймовірність помилки менша від 10^{-2} .

P_k – ймовірність вибору помилкового шляху ваги k . Для випадку жорсткого рішення (дискретний канал з двійковим виходом) визначається з умов, що на довжині послідовності на вході декодера, яка складається з k символів, буде $\frac{k+1}{2}$ і більше помилок.

$$P_k = \begin{cases} \sum_{i=\frac{k+1}{2}}^k C_k^i \cdot p_6^i \cdot (1-p_6)^{k-i} & \text{— непарне } k \\ \frac{1}{2} \cdot C_k^{\frac{k}{2}} \cdot p_6^{\frac{k}{2}} \cdot (1-p_6)^{\frac{k}{2}} + \sum_{i=\frac{k}{2}+1}^k C_k^i \cdot p_6^i \cdot (1-p_6)^{k-i} & \text{— парне } k \end{cases}, \quad (12)$$

де p_6 – канална ймовірність помилки; $C_k^i = \frac{k!}{i!(k-i)!}$ – кількість комбінацій з k по i .

Розглянемо методику пошуку еквівалентних параметрів неперервних кодів.

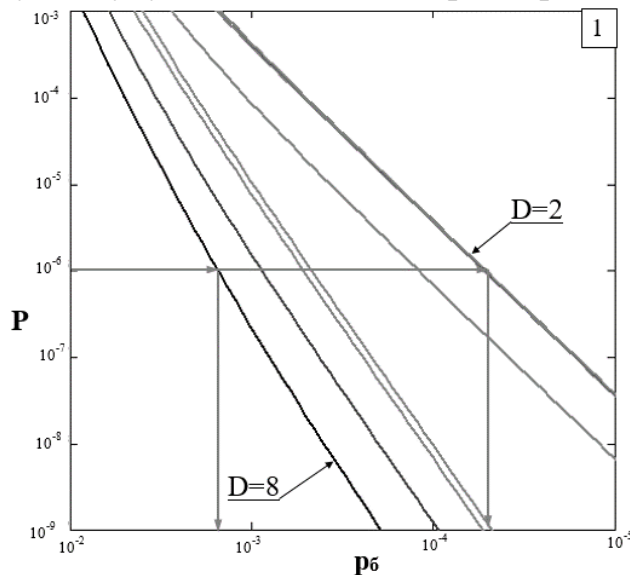


Рис. 7. Лінії завадостійкості неперервних кодів для заданого виду модуляції, для $r_c=3/4$

Для цього першим кроком побудуємо лінії завадостійкості неперервного коду – залежності ймовірності помилки на виході декодера від відношення енергії сигналу до спектральної щільності шуму $p(h^2)$ для випадку фазової маніпуляції та некогерентного прийому.

За допомогою лінії необхідної достовірності отримаємо каналні ймовірності помилки:

$$\{D, R, P\} \Rightarrow p_6 \quad (13)$$

Наступним кроком перенесемо отримані результати в область границь завадостійкого кодування, а далі в область лінії виправної здатності:

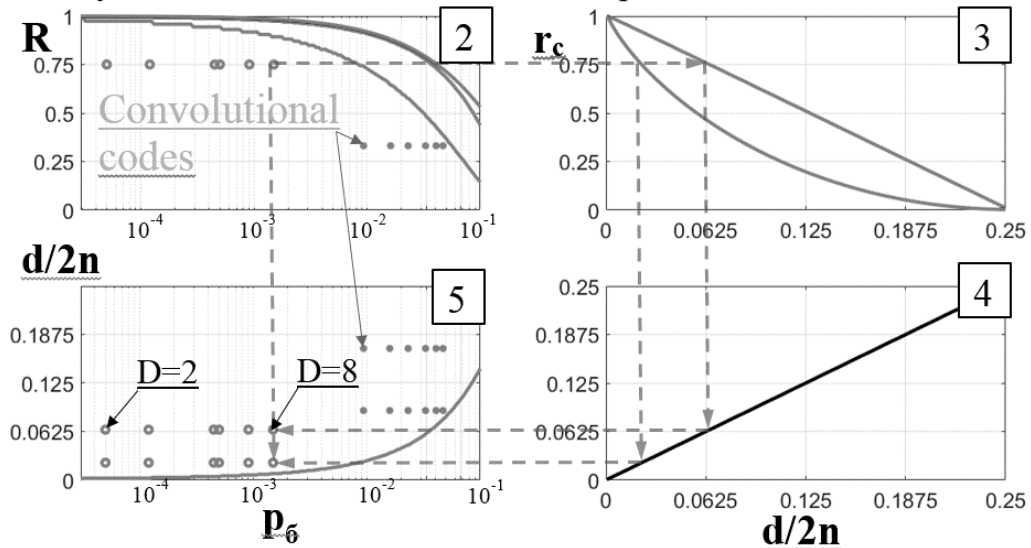


Рис. 8. Відображення неперервних кодів у області (p_6, R) та їх проекції в область лінії завадостійкості блокових кодів $(p_6, d/2n)$

Таким чином, для кожного завадостійкого коду формується дві проекції: по лінії Плоткіна та по лінії Варшамова-Гільберта. Критерієм еквівалентності параметрів блокових і неперервних кодів є умова того, що проекція завадостійкого коду належить лінії завадостійкості. Вона досягається шляхом поступового збільшення довжини кодового блоку.

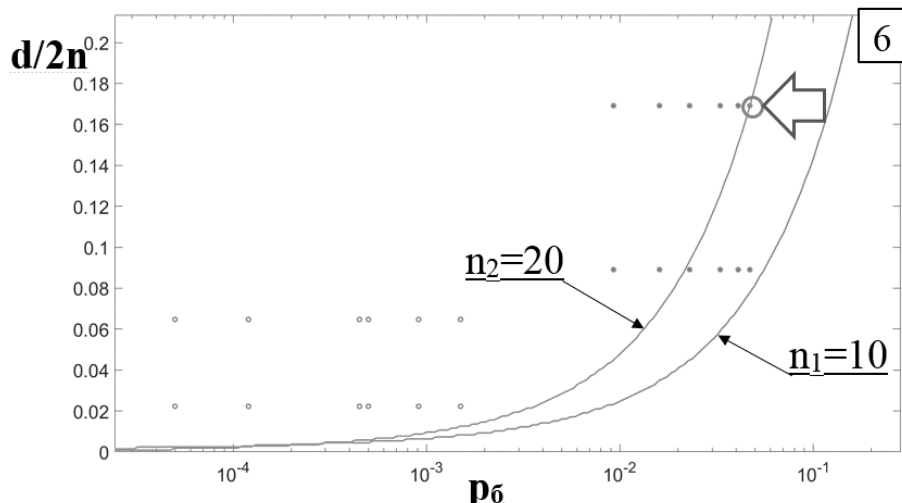


Рис. 9. Пошук довжини кодового блоку, при якій проекція неперервного коду буде належати лінії завадостійкості блокового коду

На базі методики формування параметрів блокових кодів, розроблена методика синтезу неперервних кодів, які забезпечують максимальне наближення до границі Шеннона. Користуючись даною методикою, можливо визначити оптимальний блоковий та/або неперервний код за критерієм максимальної інформаційної ефективності. При цьому в подальшому можливо зробити вибір між блоковим та еквівалентним неперервним кодом, користуючись додатковими вимогами або критеріями.

Отримана оцінка граничних можливостей блокових та неперервних кодів, як залежність границі каналної ймовірності помилки від довжини кодового блоку. Отже, неперервні коди мають жорстке обмеження по еквівалентній довжині кодового блоку. Це значить, що для забезпечення високого рівня завадостійкості при фіксованій каналній ймовірності помилки можливе використання лише блокових кодів. Перевагою неперервних кодів є більш простий алгоритм кодування та декодування, а отже й більша швидкодія даних процесів.

Побудована теоретична границя існування блокових та неперервних кодів, представлена на рис. 10, як значення каналної ймовірності помилки, для якої не існує завадостійкого коду, здатного забезпечити необхідну достовірність.

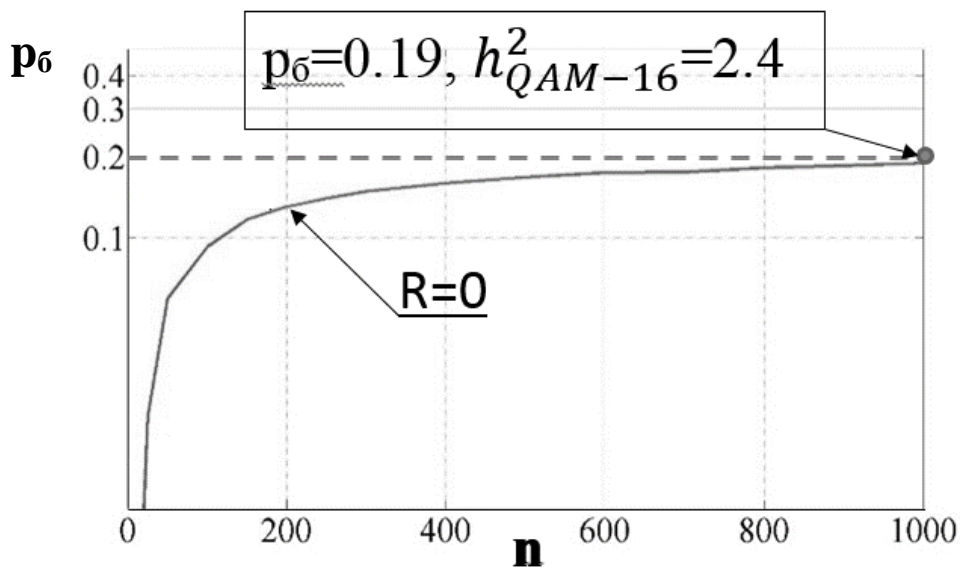


Рис. 10 Теоретична границя існування завадостійких кодів

Залежність на рис. 10 отримана у точці перетину границь Плоткіна та Варшмова-Гільберта. У цієї точці гіпотетичний завадостійкий код має найбільшу завадостійкість, але кодова швидкість $r_c = 0$.

У четвертому розділі зроблено порівняльний аналіз корегувальних властивостей каскадних та наддовгих блокових кодів.

Каскадні коди набули широкого розповсюдження завдяки властивості забезпечувати високу виправну здатність та одночасно простоту формування завдяки використанню декількох ступенів кодування (каскадів).

У найпростішому випадку в якості зовнішнього та внутрішнього кодерів використовуються блокові коди – рис. 11. При цьому нижче приведені еквівалентні параметри каскадних кодів:

$$r_c = \frac{k_1 \cdot k_2}{n_1 \cdot n_2} \quad (14)$$

$$d \geq d_1 \cdot d_2 \quad (15)$$

$$n = n_1 \cdot n_2 \quad (16)$$



Рис. 11. Зображення принципу формування кодового слова каскадного кода

Розглянемо алгоритм оцінки завадостійкості каскадних кодів.

1. Знаючи вимоги до достовірності передачі $P = 10^{-6}$ визначити ймовірність помилки суперканалу з згортковим кодом P_S .

2. Використовуючи в якості вимоги до достовірності P_S , визначити максимально допустиму ймовірність помилки p в каналі неперервного коду за допомогою ліній завадостійкості (рис. 4).

3. При відомих параметрах каналної ймовірності помилки p та вимог до достовірності $P = 10^{-6}$ знайти довжину еквівалентного блокового коду, який забезпечив би задану достовірність та мав би еквівалентну кодову швидкість. Параметри еквівалентного коду і будуть параметрами каскадного коду.

На базі описаної методики виконаємо оцінку граничних властивостей каскадних кодів, результат якої представлений на рис. 12.

Таким чином, встановлено, що збільшення довжини коду (наприклад, еквівалентної довжини блоку у каскадному коді) покращує корегувальні властивості завадостійких кодів.

Каскадні коди дозволяють отримати кодову конструкцію зі значною еквівалентною довжиною блоку за рахунок декількох ступенів кодування. Така результуюча конструкція має високу корегувальну здатність та дозволяє передавати інформацію в каналі з низькою енергетикою.

Розглянуті каскадні коди є більш ефективними за критерієм корегувальної здатності ніж неперервні коди та можуть порівнюватися за ефективністю з блоковими кодами довжиною $n \approx 1000$.

Зворотною стороною використання каскадних кодів є висока надлишковість, тому в каналах з більш високою енергетикою доцільніше використання блокових кодів.

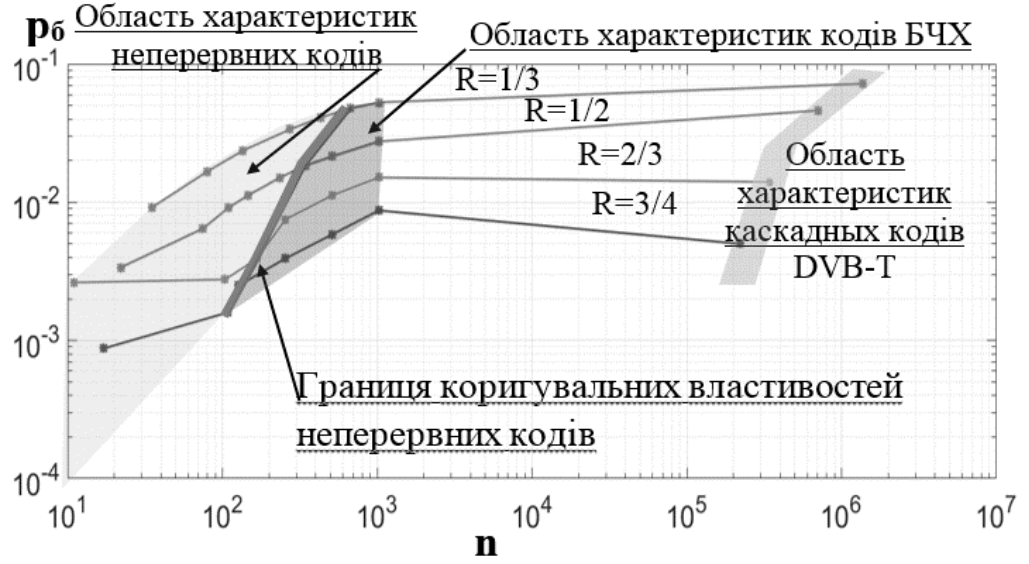


Рис. 12. Відображення параметрів блокових та неперервних завадостійких кодів в координатах достовірності $p(n)|r_c \in \{\frac{1}{3}; \frac{1}{2}; \frac{2}{3}; \frac{3}{4}\}$

У п'ятому розділі запропоновано методику синтезу оптимальної сигнально-кової конструкції за критерієм максимуму інформаційної ефективності у каналі зв'язку з заданими параметрами.

1. Необхідно визначити для заданих $h^2 \in [h_{min}^2; h_{max}^2]$ значення каналних ймовірностей помилок p_b для кожного з видів модуляцій: ФМ-2, QPSK, QAM-16, QAM-64. Приклади співвідношень для обчислення каналної ймовірності помилки для QPSK та QAM-16 приведені нижче:

$$P_{S_QPSK}(h^2) = \frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \frac{-h^2}{e^{\sin^2 \beta (1 - \cos \beta)^2}} d\beta \quad (17)$$

$$P_{b_QPSK}(h^2) = \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{5}}^{\frac{5\pi}{4}} \frac{h^2}{e^{(\sin \alpha - \cos \alpha)^2}} d\alpha \quad (18)$$

$$P_{b_QAM16}(h^2) = \frac{P_{ou_b_1}(h^2) + P_{ou_b_2}(h^2)}{2}, \quad (19)$$

де $P_{ou_b_1}$ та $P_{ou_b_2}$ обчислюються за виразами:

$$P_{ou_b_1}(h^2) = \frac{\frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{5\pi}{4}} e^{\frac{-h^2}{2(\cos \alpha - \sin \alpha)^2}} d\alpha + \frac{1}{2\pi} \int_{\arctg(3)}^{\pi + \arctg(3)} e^{\frac{-5h^2}{18(\cos \alpha + \frac{\sin \alpha}{3})^2}} d\alpha + \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{5\pi}{4}} e^{\frac{-h^2}{18(\sin \alpha - \cos \alpha)^2}} d\alpha}{4}$$

$$P_{ou_6_2}(h^2) = \frac{\frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{5\pi}{4}} e^{\frac{-h^2}{18(\cos\alpha - \sin\alpha)^2}} d\alpha - \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{5\pi}{4}} e^{\frac{-h^2}{50(\cos\alpha - \sin\alpha)^2}} d\alpha + \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{3\pi}{4}}^{\frac{5\pi}{4}} e^{\frac{-h^2}{18(\cos\alpha - \sin\alpha)^2}} d\alpha}{2}$$

Результати обчислень наведені на рис. 13.

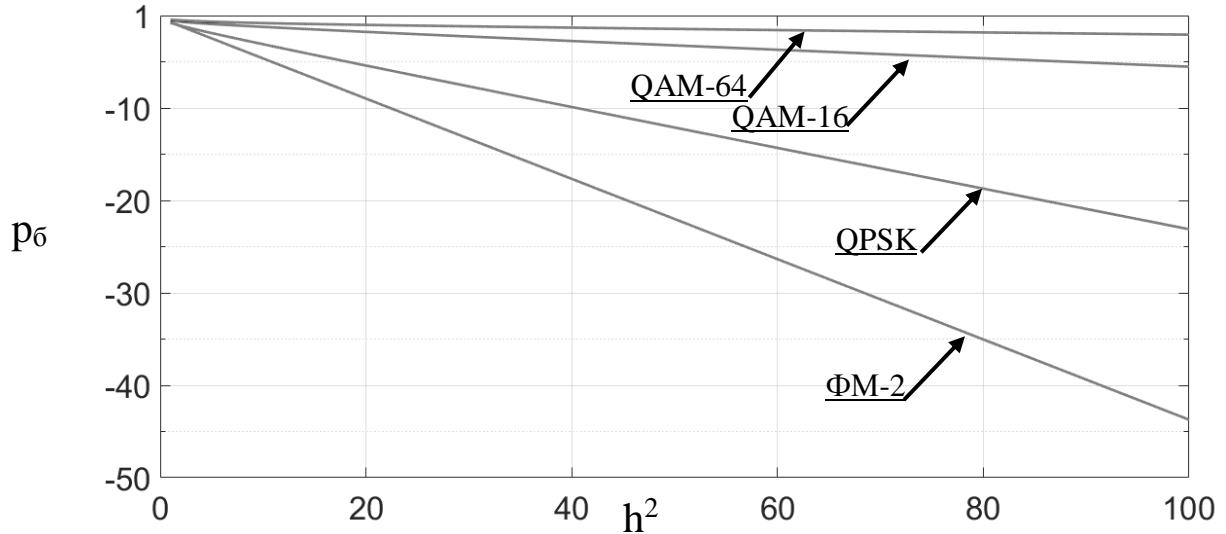


Рис. 13. Залежність каналної ймовірності помилки від енергетики $h^2 \in [0; 100]$ для наступних видів модуляції: ФМ-2, QPSK, QAM-16, QAM-64

2. Для кожної знайденої ймовірності помилки необхідно визначити параметр r_c гіпотетично існуючого завадостійкого коду. Для цього використовується методика пошуку оптимального завадостійкого коду.

2.1. Для кожного набору (p_0, P) визначається необхідна кількість символів t , яку потрібно виправити на деякій фіксованій довжині кодового блоку n . При цьому довжина блоку має задовольняти нерівності $n > 600$, оскільки на зазначеному інтервалі границі завадостійкого кодування Плоткіна та Варшавова-Гільберта залишаються незмінними.

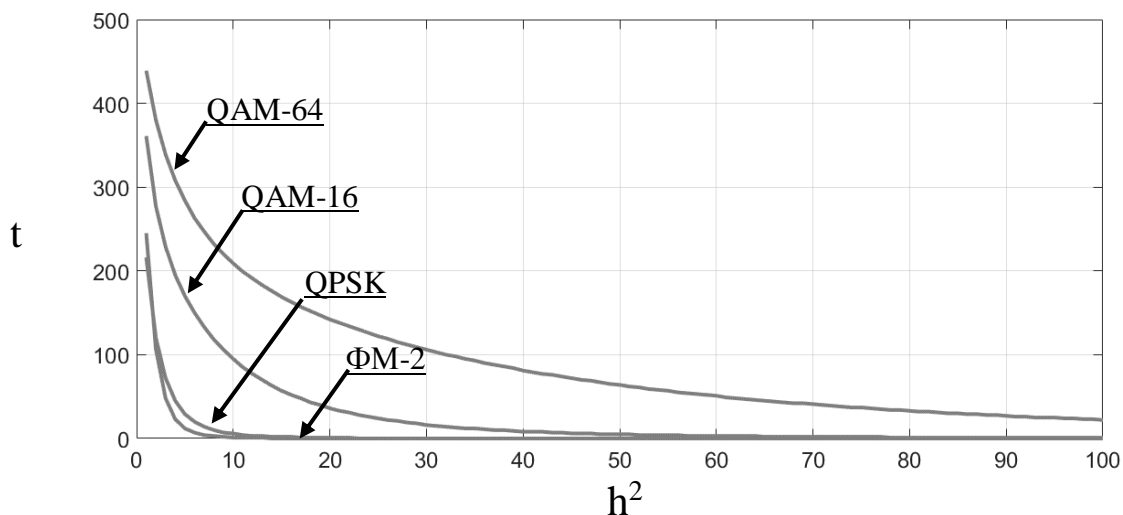


Рис. 14. Залежність необхідної корегувальної здатності гіпотетичного завадостійкого коду довжини $n=1023$ від енергетики $h^2 \in [0; 100]$ для наступних видів модуляції: ФМ-2, QPSK, QAM-16, QAM-64

2.2. При відомих значеннях t та n з використанням границі Варшавова-Гільберта, яка гарантує існування завадостійкого коду з негіршими властивостями, визначається значення кодової швидкості r_c

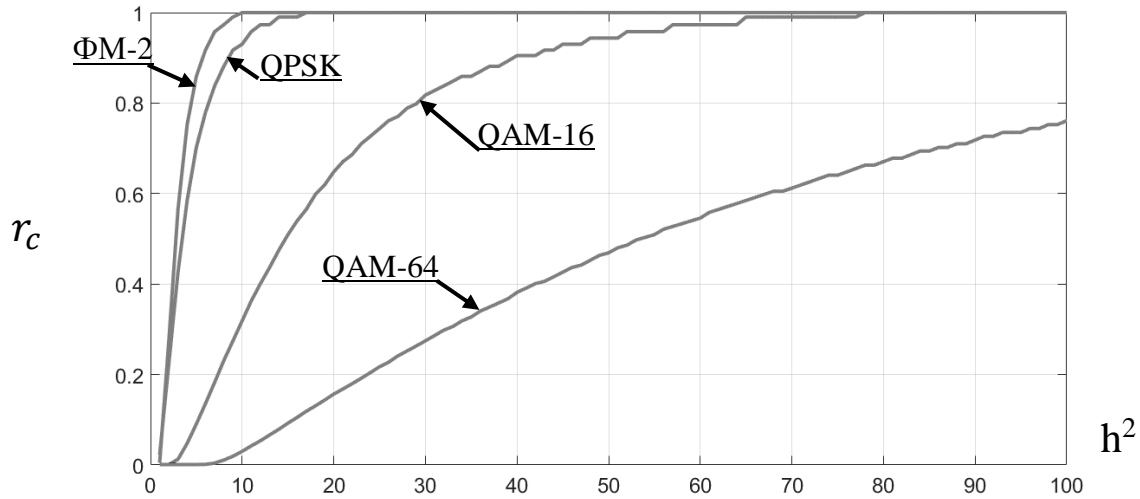


Рис. 15. Залежність кодової швидкості гіпотетичного завадостійкого коду довжини $n=1023$ від енергетики h^2 для наступних видів модуляції: ФМ-2, QPSK, QAM-16, QAM-64

3. Для кожного h^2 та виду модуляції визначається добуток інформаційної ємності m і кодової швидкості r_c . Результатом даного кроку будуть набори значень $(r_{c_B-Г} \cdot m)_{\text{ФМ-2}}$, $(r_{c_B-Г} \cdot m)_{\text{QPSK}}$, $(r_{c_B-Г} \cdot m)_{\text{QAM-16}}$, $(r_{c_B-Г} \cdot m)_{\text{QAM-64}}$

4. Визначення для кожного h^2 максимального значення $(r_c \cdot m)$ серед отриманих на попередньому кроці. На даному етапі для кожного h^2 визначається оптимальний вид модуляції та параметри гіпотетичного завадостійкого коду.

Для визначення інформаційної ефективності використовується наступний вираз, отриманий на основі співвідношень (1)-(4):

$$\eta = \frac{r_c \cdot m \cdot [1 + P \cdot \log P + (1 - P) \cdot \log(1 - P)]}{\log_2(1 + h^2)} \quad (20)$$

Результат пошуку максимуму інформаційної ефективності та добутку $(r_c \cdot m)$ представлений на рис. 16.

5. Пошук оптимального завадостійкого коду за критерієм $r_c > r_{c_B-Г}$. При цьому враховується обмеження складності кодування, яке виражається у довжині кодового блоку для блокових кодів, еквівалентній довжині блоку для каскадних кодів, та еквівалентній довжині блоку та довжині кодового обмеження для неперервних кодів.

Таким чином, при збільшенні енергетики в точці прийому при певних порогових h^2 доцільно переходити до сигналів більшої позиційності та застосовувати відповідні завадостійкі коди. Збільшення енергетики еквівалентно зменшенню відстані між приймачем та передавачем інформації.

Використовуючи наведену методику на прикладі стандарту DVB-T2 обраховані оптимальні точки зміни швидкості кодування та порядку маніпуляції, які представлені на рис. 17.

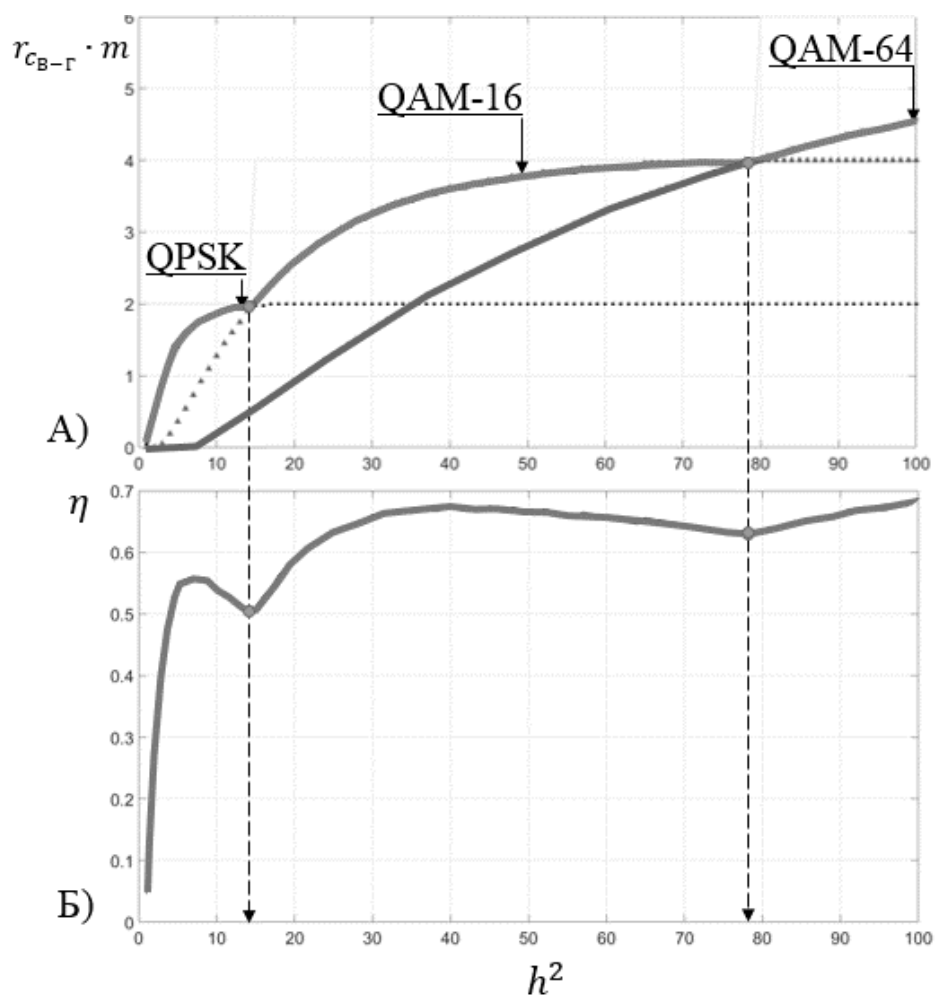


Рис. 16. Результат визначення максимуму ($r_c \cdot m$) (А) та інформаційної ефективності (Б) від енергетики $h^2 \in [0; 100]$ серед наступних видів модуляції: ФМ-2, QPSK, QAM-16, QAM-64

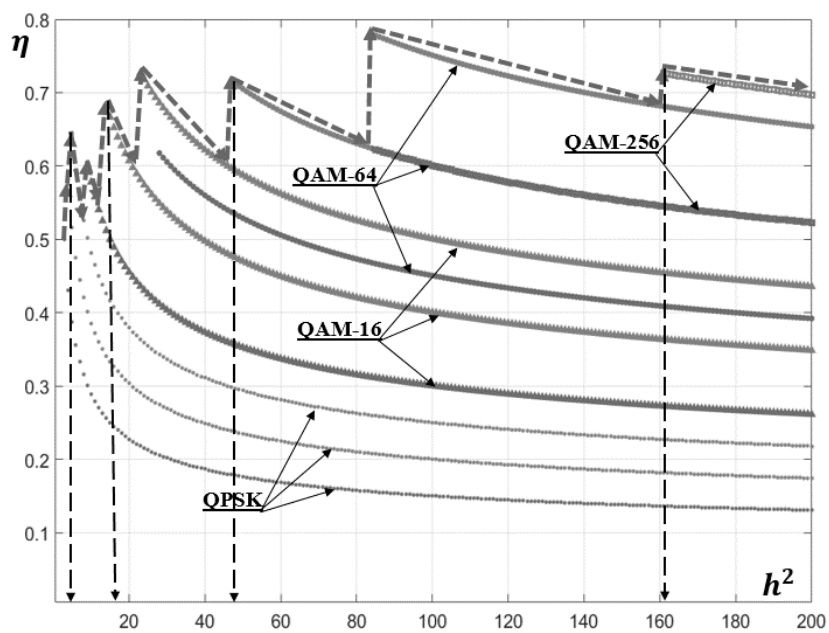


Рис. 17. Ілюстрація переключень між модуляціями та завадостійким кодуванням для досягнення максимальної інформаційної ефективності

Дані обчислення можуть бути використані для побудови дуплексної лінії радіозв'язку з адаптивним кодуванням та модуляцією, яка відрізняється тим, що для кожного h^2 забезпечує найкращий показник інформаційної ефективності.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі отримано вирішення важливої та актуальної наукової задачі дослідження методів синтезу сигнально-кодових конструкцій, що забезпечують максимальне наближення до границі Шеннона, а саме – розробка точної методики формування сигнально-кодових конструкцій, яка дозволяє передавати повідомлення джерела з максимальною швидкістю та необхідною достовірністю при заданих енергетичних параметрах каналу зв'язку.

В ході дисертаційного дослідження наступні основні результати:

1. Методика синтезу завадостійких кодів, оптимальних за критерієм максимального наближення продуктивності джерела до границі Шеннона, яка відрізняється тим, що дозволяє для каналу зв'язку із відомими енергетичними параметрами обрати такий код, який дозволив би передавати повідомлення джерела з максимальною швидкістю кодування за умов забезпечення заданої достовірності.
2. Методика порівняння виправних здібностей завадостійких кодів різних видів, яка відрізняється тим, що з використанням особливих характеристик неперервних та каскадних кодів визначаються їх коригувальні здібності за порівняльними параметрами еквівалентних блокових кодів.
3. Методика синтезу сигнально-кодових конструкцій, оптимальних за критерієм максимального наближення продуктивності джерела до границі Шеннона, яка відрізняється тим, що, поєднуючи у собі положення теорії інформації і теорії завадостійкого кодування, дозволяє для каналу зв'язку із відомими енергетичними параметрами обрати таке сполучення модуляції і завадостійкого коду, який дозволив би передавати повідомлення джерела з максимальною швидкістю за умов забезпечення заданої достовірності.
4. Вперше отримана оцінка границь існування завадостійких кодів, яка відрізняється тим, що використовує теоретичні границі існування завадостійких кодів та дозволяє для відомої енергетики в каналі зв'язку визначити код, здатний забезпечити необхідну достовірність, або довести відсутність такої можливості.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Урывский Л. А., Прокопенко Е. А., Пешкин А. М. Выбор блочного помехоустойчивого кода по критерию максимального приближения к границе Шеннона // Telecommunication Sciences. – К.: NTUU 'KPI'. – 2011. – № 1. – С. 41-47. (Google Scholar, OpenAIRE, BASE та інші).

Здобувачем реалізовано методику вибору блочного завадостійкого коду за критерієм максимального наближення до границі Шеннона.

2. Uryvsky L., Prokopenko K., Peshkin A. The convolutional codes analysis technique on the optimum block codes grounds// Information and Telecommunication Sciences. – К.:

NTUU 'KPI'. – 2014. – № 2, p.8-13. (Google Scholar, OpenAIRE, BASE та інші)

Здобувачем розроблено методику аналізу і синтезу неперервних кодів за критерієм максимального наближення до границі Шеннона

3. Уривський Л.О., Пешкін А.М. Методика оцінки граничної інформаційної ефективності завадостійких кодів// Information and Telecommunication Sciences, – К.: NTUU 'KPI'. – 2016. – № 2. – p.70-74. (Google Scholar, OpenAIRE, BASE та інші)

Здобувачем визначено методику оцінки граничної інформаційної ефективності завадостійких кодів.

4. Уривский Л.А., Пешкин А.М. Оценка энергетических границ использования каскадных кодов – Budapest, Hungary: The scientific heritage - № 8, 2017, p. 91-97. (Scientific Indexing Services, General Impact Factor та інші)

Здобувачем проведено оцінку енергетичних границь використання каскадних кодів.

5. Uryvskiy L. Pieshkin A. The informational efficiency improving methods of the signal-code constructions with the condition of providing required reliability - Budapest, Hungary: The scientific heritage - № 11, 2017 - p.p. 72...77. (Scientific Indexing Services, General Impact Factor та інші)

Здобувачем проведено аналіз інформаційної ефективності впровадження методів сигнальних конструкцій за умови забезпечення необхідної достовірності.

6. Уривський Л. О., Вергун С.М., Мошинська А В., Осипчук С.А. Пешкін А.М. Спосіб досягнення максимальної продуктивності в дискретному каналі зв'язку із завадостійким кодуванням / Патент на корисну модель № UA-117164-U від 26.06.2017.

7. Пешкин А.М. Оцінка корегуючих властивостей кодів Ріда – Соломона у каналі з білим шумом// 5-а міжнародна конференція молодих вчених «Інфокомунікації – сучасність та майбутнє» – Збірка тез, ч.3. – Одеса: ОНАЗ, – 2015 – с. 66...69.

8. Пешкін А.М. Порівняння методик синтезу параметрів коригуючих кодів для оцінки їх завадостійких властивостей// 4-а міжнародна науково-практична конференція Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки 23-25 жовтня 2014 р., - Чернівці, Україна - Збірник тез, с.95-96.

9. Уривский Л.А., Пешкин А.М. Исправляющая способность блочных помехоустойчивых кодов в пределах аксиоматики Шеннона// 2-а міжнародна конференція молодих вчених «Інфокомунікації — сучасність та майбутнє». Збірка тез, ч.1. – Одеса: ОНАЗ, – 2012 – с. 33...36.

10. Уривський Л.О., Пешкін А.М. Аналіз принципів формування та коригуючих можливостей каскадних кодів // Десята МНТК «Проблеми телекомунікацій-2016», с. 58-61.

11. Уривський Л.О., Пешкін А.М. Оцінка граничних коригуючих можливостей неперервних кодів через еквівалентні параметри блокових кодів// Сьома МНТК «Проблеми телекомунікацій-2013», с. 350-353.

12. Уривский Л. А., Пешкин А.М. Відображення параметрів неперервних кодів в просторі відображення блокових кодів // Дев'ята МНТК «Проблеми телекомунікацій», ІТС НТУУ «КПІ», м.Київ, 2015. – с.65-67.

13. Уривський Л.О., Прокопенко К.А., Пешкін А.М. Визначення границь коригувальних властивостей блокових кодів // Збірник наукових праць – Львів, «Львівська політехніка», 2011, №705, с. 98 – 104.
14. Uryvsky L., Pieshkin A. The Reed – Solomon codes analysis technique on the optimum block codes ground in the channel with white noise [Електронний ресурс] // IEEE Міжнародна конференція з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7739631/>.
15. Uryvsky L., Pieshkin A. Assessment of Information Efficiency of Error-correcting Codes in Plotkin bound [Електронний ресурс] // IEEE Міжнародна конференція з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8095413/>.

АНОТАЦІЯ

Пешкін А.М. Формування сигнально-кодових конструкцій на основі кодів, забезпечуючих максимальне наближення до границі Шеннона. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02. – телекомунікаційні системи та мережі. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2018.

Досліджені актуальні проблеми використання сигнально-кодових конструкцій у сучасних телекомунікаційних системах з позиції максимального використання ресурсу каналу зв'язку.

Метою дослідження є синтез сигнально-кодових конструкцій, які максимально наближують продуктивність каналу зв'язку до його пропускної здатності, забезпечуючи при цьому задану достовірність передачі інформації.

Запропоновано спосіб визначення необхідної виправної здатності завадостійких кодів при заданих вимогах до достовірності і заданій довжині кодового блоку, методика оцінки ефективності завадостійких кодів за критерієм максимального наближення до границі Шеннона, методика синтезу завадостійких кодів за критерієм максимального наближення до границі Шеннона, методика порівняння завадостійких властивостей блокових, неперервних та каскадних кодів за критерієм еквівалентної виправної здатності; визначено енергетичні границі використання різних видів завадостійких кодів; розроблено методику синтезу сигнально-кодових конструкцій за критерієм максимального наближення продуктивності каналу зв'язку до його пропускної здатності.

Ключові слова: завадостійке кодування, границя Варшимова-Гільберта, границя Плоткіна, границя Шеннона, пропускна здатність, продуктивність, багатопозиційні сигнали, сигнально-кодові конструкції, частотна, енергетична, інформаційна ефективності.

АННОТАЦИЯ

Пешкин А.М. Формирование сигнально-кодовых конструкций на основе кодов, обеспечивающих максимальное приближение к границе Шеннона. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.02. – телекоммуникационные системы и сети. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» МОН Украины, Киев, 2018.

Исследованы актуальные проблемы использования сигнально-кодовых конструкций в современных телекоммуникационных системах с позиции максимального использования ресурса канала связи.

Целью исследования является синтез сигнально-кодовых конструкций, которые максимально приближают производительность канала связи к его пропускной способности, обеспечивая при этом требуемую достоверность передачи информации.

Предложен способ определения необходимой исправляющей способности помехоустойчивых кодов при заданных требованиях к достоверности и заданной длине кодового блока в зависимости от энергетики в канале связи и вида используемой модуляции. Для оценки исправляющей способности использовалось выражение биномиального распределения в бинарном канале. Разработана методика оценки эффективности помехоустойчивых кодов по критерию максимального приближения к границе Шеннона, которая позволяет определить целесообразность применения помехоустойчивого кода в канале с заданной энергетикой и видом модуляции для достижения требуемой достоверности. Предложена методика синтеза помехоустойчивых кодов по критерию максимального приближения к границе Шеннона, которая позволяет выбрать наилучший код для канала с заданными параметрами и требуемой достоверностью. Разработана методика сравнения свойств блочных, непрерывных и каскадных кодов по критерию эквивалентной исправляющей способности. Результатом данной методики являются параметры непрерывных и каскадных кодов, эквивалентные блочным, которые позволяют использовать непрерывные и каскадные коды при синтезе оптимального помехоустойчивого кода. Определены энергетические границы использования различных видов помехоустойчивых кодов, которые раскрывают область неопределенности теоремы Шеннона, отвечая на вопрос о возможности обеспечения требуемой достоверности и о параметрах реальных кодов при конечной кодовой длине. Разработана методика синтеза сигнально-кодовых конструкций по критерию максимального приближения производительности канала связи к его пропускной способности. Данная методика позволяет адаптировать сигнально-кодовую конструкцию под изменение энергетики в канале связи, что позволяет добиться максимальной информационной эффективности, а значит, наилучшим образом использовать ограниченный ресурс канала связи. Рассчитан пример использования данной методики для сигнально-кодовых конструкций, используемых в стандарте DVB-T2.

Ключевые слова: помехоустойчивое кодирование, граница Варшамова-Гильберта, граница Плоткина, пропускная способность, производительность, многопозиционные сигналы, сигнально-кодовые конструкции, частотная, энергетическая, информационная эффективности.

ABSTRACT

Pieshkin A. Signal-code constructions generation based on codes, which provide maximum approach to the Shannon bound. - Manuscript

Thesis for the doctor of philosophy degree in technical sciences, specialty

05.12.02 – telecommunication systems and networks. – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", MES of Ukraine, Kiev, 2018.

This research covers relevant problems of signal-code constructions usage in modern telecommunication systems from the point of maximum utilization of communication channel resources.

The aim of the research is signal-code construction generation, which maximize the performance of the communication channel to its bandwidth and provide required reliability.

Author proposes a method of determining of required correcting ability of redundant code at the given reliability requirements and the specified block length, code efficiency assessment method by the criteria of maximum approach to the Shannon border, a comparison method of properties of block, convolutional and concatenated codes by the criteria of equivalent correcting ability; this research identifies energy bounds evaluation of different types of error-correcting codes usage; the study provides a methodology of synthesis of signal-code constructions by the criteria of productivity maximum approach to the channel throughput.

Keywords: redundant coding; Varshamov-Gilbert bound; Plotkin bound; Shannon bound; throughput; productivity; multi-position signals, signal-code constructions, frequency, power, information efficiency.